

УДК 621.396

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ РАДИОСВЯЗИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Е.И. ГРИГОРЬЕВА, М.Ю. ЗАМАЛДИНОВ

Выполняется преобразование формулы расчета коэффициента готовности канала радиосвязи в компактную форму и строится график зависимости превышения мощности сигнала на входе приемника над его реальной чувствительностью от уровня помех, при обеспечении требуемого значения коэффициента готовности радиоканала. Результаты данных исследований могут быть использованы при разработке системы управления безопасностью полетов при организации воздушного движения.

**Ключевые слова:** радиосвязь, надежность, сигнал.

В связи с ростом интенсивности воздушного движения в последние два десятилетия резко возросли требования по улучшению характеристик средств радиотехнического обеспечения (РТО). А так как для каналов радиосвязи качество функционирования – надежность определяется не только техническим состоянием средств РТО, но и характеристиками сигнала и помех, воздействующих на вход радиоприемного устройства [4], то для повышения или поддержания работы по обеспечению воздушного движения (ОВД) на уровне, не превышающем приемлемый уровень безопасности, необходимо уделять внимание определению характеристик надежности радиосвязи.

При рассмотрении данного вопроса определим начальные условия и допущения. В работе канала радиосвязи участвует  $n$  передающих устройств, каждое из которых одновременно является источником помех. Для расчета показателей надежности средств РТО будет использоваться модель изменения качества функционирования в виде дискретного полумарковского процесса. Принимаем, что при срыве радиосвязи под воздействием помех происходит восстановление качества функционирования после прекращения действия этих помех. Известны функции распределения длительностей работы каждого передатчика  $i$  на излучение  $F_i^1(\tau)$  и пауз  $F_i^0(\tau)$  во времени.

Решение для функции готовности канала радиосвязи в этом случае дается формулой:

$$G_n(t) = \sum_{i=1}^k P_i^0 \sum_{j \in k} \Phi_{ij}(t), \quad (1)$$

Для большого числа средств в комплексе  $n$  при всей строгости такого решения получить выражение для  $G_n(t)$  в компактной форме не удастся. Для устранения этого недостатка внесем следующие допущения, что время первого достижения функцией  $G_n(t)$  значения  $G_n(\infty)$  прямо пропорционально среднему значению интервала между импульсами помех. Поэтому можно считать, что увеличение числа источников помех ведет только к уменьшению времени  $t_1$ .

В связи с этим надежность канала радиосвязи можно характеризовать значением коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma\Pi} = \sum_{j \in k_1} \Phi_j, \quad (2)$$

где  $\Phi_j$  - финальные интервально-переходные вероятности полумарковского процесса  $q(t)$ .

Значение  $\Phi_j$  - это доля времени пребывания в  $j$ -том состоянии полумарковского процесса  $q(t)$  в установившемся режиме, поэтому финальные вероятности  $\Phi_j$ , могут быть легко выражены через соответствующие финальные вероятности  $\Phi_j^{si} (s=0,1)$  потоков  $\xi_i(t)$ , описывающих процессы переключения передающих средств комплекса. Событие, заключающееся в пребывании  $q(t)$  в  $j$ -ом состоянии, имеет место только в том случае, когда имеет место соответствующий ему набор состояний потоков  $\xi_i(t)$ .

Поэтому  $\Phi_j = \Phi_1^{s_1} \cdot \Phi_2^{s_2} \dots \Phi_n^{s_n}$  (3), где последовательность  $s_1, s_2, \dots, s_n$  образует код  $j$ -го состояния процесса  $q(t)$ .

В свою очередь,  $\Phi_i^{si}$  могут быть выражены через средние безусловные времена пребывания потоков  $\xi_i(t)$  в состояниях:

$$\langle T_i \rangle^{si} = \int_0^{\infty} [1 - F_i^s(t)] dt. \quad (4)$$

Процессы  $\xi_i(t)$  являются альтернирующими, финальные вероятности вложенных в них цепей Маркова, не зависят от состояний потоков  $\xi_i(t)$ . Поэтому:

$$\Phi_i^{si} = \frac{\langle T_i^{st} \rangle}{\langle T_i^1 \rangle + \langle T_i^0 \rangle}. \quad (5)$$

Подставляя (3), (5) в (2) после несложных преобразований, получим:

$$K_{\Gamma\Pi} = \frac{\sum_{j \in K} \langle T_1^{s_1} \rangle \langle T_2^{s_2} \rangle \dots \langle T_n^{s_n} \rangle}{\sum_{j \in K} \langle T_1^{s_1} \rangle \langle T_2^{s_2} \rangle \dots \langle T_n^{s_n} \rangle}. \quad (6)$$

где  $K = 2^n$  - множество состояний  $q(t)$ ;

$K_1$  - подмножество работоспособных состояний;

$j$  - определяет код последовательности  $s_1, s_2, \dots, s_n$ .

Для того, чтобы учесть разброс параметров средств в комплексе, будем считать, что частотные и энергетические параметры воздействующих помех, а также энергетические параметры приемопередающих средств канала связи являются случайными величинами. В этом случае требуемое качество функционирования каналов связи в каждом состоянии процесса  $q(t)$  обеспечивается с вероятностью  $P_{k\phi i}$ . То есть каждое  $i$ -ое состояние  $q(t)$  может быть отнесено к подмножеству работоспособных состояний с вероятностью  $P_{k\phi i}$  и неработоспособных состояний с вероятностью  $1 - P_{k\phi i}$ .

Можно предложить иной способ расчета коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma\Pi} = \sum_{j=1}^k P_{k\phi i} \Phi_j. \quad (7)$$

который, по существу, является иной формой записи (2). Действительно, если достоверно известно, что в  $l$ -том состоянии процесса  $q(t)$  требуемое качество функционирования не обеспечивается и в (2) оно относится к подмножеству неработоспособных и тем самым также исключается из расчета. Таким образом, при случайных параметрах сигнала и помех коэффициент готовности радиоканала можно рассчитать из (7).

Рассмотрим конкретный пример, ограничиваясь случаем воздействия на радиоприемное устройство канала связи двух помех. Функции распределения длительности  $\tau_i^1$  и  $\tau_i^0$  заданы:

$$\begin{aligned}\frac{dF_1^1(t)}{dt} &= \frac{\lambda_i^{ni}}{\Gamma(ni)} t^{ni-1} e^{-\lambda_i t}; \\ \frac{dF_1^0(t)}{dt} &= \eta_i e^{-\eta_i t}.\end{aligned}\quad (8)$$

Совместное воздействие двух помех приводит к возникновению интермодуляционного канала приема, а воздействие каждой из них может проявляться по внеполосным каналам приема. Соответственно обозначим состояния радиоприемного устройства: 1 - отсутствие помех; 2, 3 - воздействие одной из помех; 4 - совместное их воздействие.

Тогда для вероятностей обеспечения требуемого качества функционирования в каждом состоянии, можем записать:

$$\begin{aligned}P_{k\Phi_1} &= \Phi\left(\frac{m_{cbx} - m_0}{\delta_0 \sqrt{1+r^2}}\right); \\ P_{k\Phi_2} &= \Phi\left(\frac{m_{cbx} - m_0 - k_1 m_{nbx} q_{\text{доп}}}{\delta_0 \sqrt{1+r^2}}\right); \\ P_{k\Phi_3} &= \Phi\left(\frac{m_{cbx} - m_0 - k_2 m_{nbx} q_{\text{доп}}}{\delta_0 \sqrt{1+r^2}}\right); \\ P_{k\Phi_4} &= \Phi\left(\frac{m_{cbx} - m_0 - k_4 m_{nbx} q_{\text{доп}}}{\delta_0 \sqrt{1+r^2}}\right),\end{aligned}$$

где  $k_1, k_2, k_4$  - коэффициент передачи радиоприемного устройства по интермодуляционному и внеполосным каналам приема на частотах первой и второй помехи соответственно;

$m_{n1} = m_{n2} = m_{nbx}$  - математическое ожидание мощности воздействующих помех на входе радиоприемного устройства.

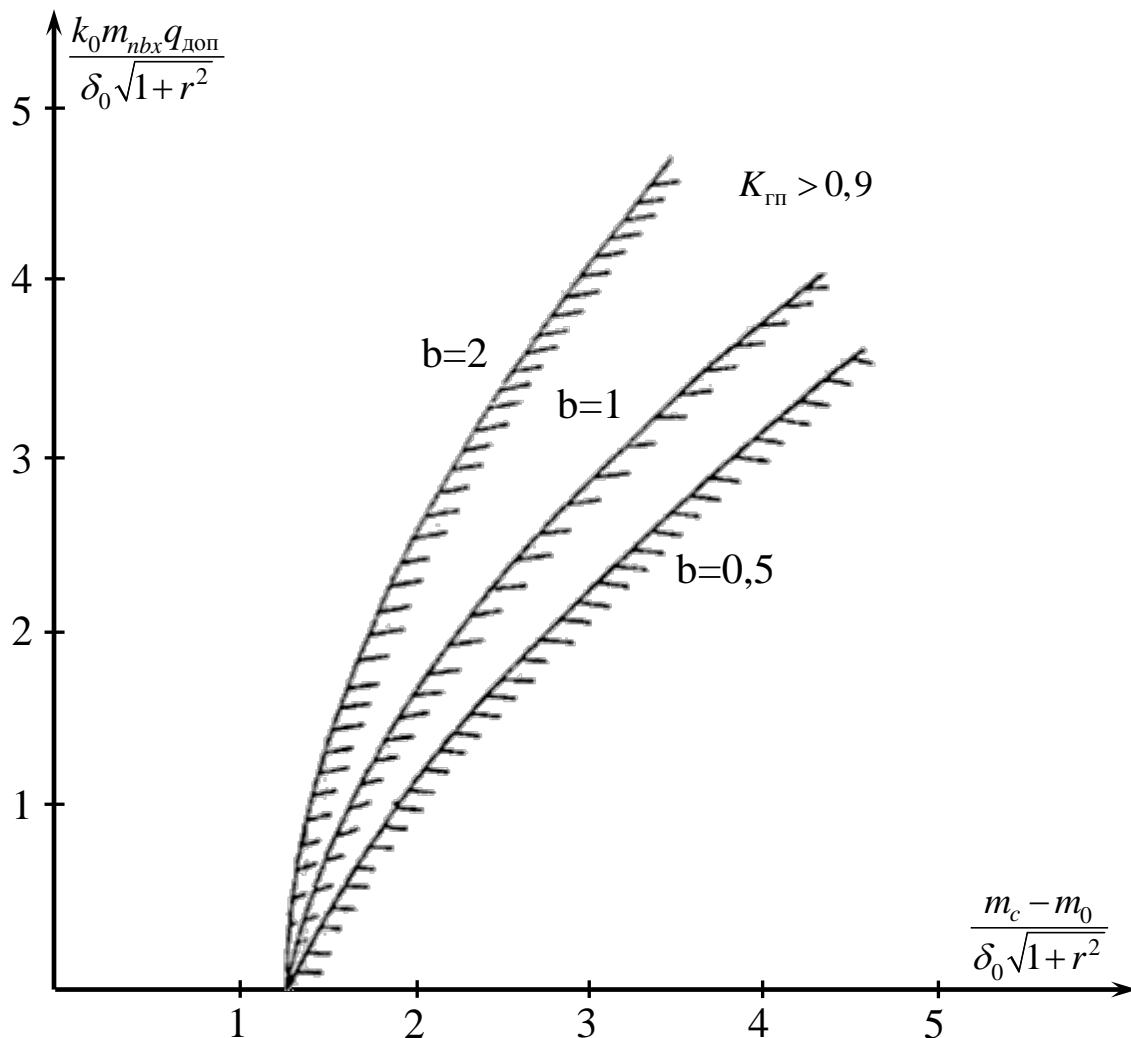


Рисунок. Область параметров средств, при которых обеспечивается требуемое значение  $K_{гп}$

Подставляя (8) в (4), (5), (3) для вероятностей состояний процесса изменения качества функционирования канала связи, получаем:

$$\Phi_1 = \frac{b_1 b_2}{(b_1 + 1)(b_2 + 1)}; \quad \Phi_2 = \frac{b_1}{(b_1 + 1)(b_2 + 1)};$$

$$\Phi_3 = \frac{b_2}{(b_1 + 1)(b_2 + 1)}; \quad \Phi_4 = \frac{1}{(b_1 + 1)(b_2 + 1)},$$

где  $b_i = \lambda / n_i \eta_i$ .

При  $k_1 \approx k_2 \approx 0$  для коэффициента готовности канала связи по отказам, обусловленным воздействием помех, получим:

$$K_{гп} = P_{k\Phi_1} - (P_{k\Phi_1} - P_{k\Phi_4}) \cdot \Phi_4.$$

График зависимости превышения мощности сигнала на входе приемника над его реальной чувствительностью от уровня помех по интермодуляционному каналу приема, при которых обеспечивается требуемое значение коэффициента готовности радиоканала  $K_{гп}$  приведен на рис. 1 при расчетах принималось  $b_1 = b_2 = b$ .

Как видно из графиков, при известной средней мощности помех можно предъявить обоснованные требования к уровню сигнала на входе приемника, который при заданных допусках на параметры средств радиосвязи, обеспечивает требуемое значение показателя надежности радиосвязи или при заданных значениях мощности сигнала и чувствительности радиоприемного устройства предъявить требования к допускам на параметры приемопередающих средств.

Данная методика по определению характеристик надежности канала радиосвязи может использоваться при факторном анализе опасности при ОВД, а также для вычисления и мониторинга уровня безопасности полетов в реальном времени.

Исходя из вышесказанного, в общем случае оптимальные значения параметров приемо-передающих средств канала связи будут различны для каждого набора включенных передающих средств в комплексе. Обеспечение требуемых показателей качества функционирования и надежности канала связи в случаях меняющейся помеховой обстановки требует адаптивной регулировки параметров приемопередающих средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крыжановский Г.А., Червяков М.В. Оптимизация авиационных систем передачи информации. – М.: Транспорт, 1990.
2. Под общ. ред. Мокшанова В.И. Проблемы организации управления воздушного движения. Безопасность полетов // Сб. научных трудов. ГосНИИ «Аэронавигация», 2002. Вып. 4.
3. Тучков Н.Т. Автоматизированные системы и радиоэлектронные средства управления воздушным движением: учеб. пособие для вузов. – М.: Транспорт, 1994.
4. Соломенцев В.В., Игнатенко О.А. Особенности эксплуатации технических и программных средств АС УВД // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 92.
5. Униченко Е.Г., Зубков Б.В. Количественная оценка уровня безопасности полетов в авиапредприятии // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 130.
6. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1976.
7. Воробьев В.Г., Константинов В.Д. Надежность и эффективность авиационного обслуживания. – М.: Транспорт, 1995.

## CHARACTERIZATION OF THE RELIABILITY OF RADIO COMMUNICATIONS WITH AIR TRAFFIC SERVICES

Grigorieva E.I., Zamaldinov M.U.

Convert formulas to calculate the availability of the radio channel in a compact form, and the graph of dependence of the excess signal power at the receiver input over its actual sensitivity of the level of interference, while ensuring the required value of the availability of the radio channel.

**Key words:** radio communication, reliability, signal.

## REFERENCES

1. Krizhanovsky G.A., Chervyakov M.V. Optimization of aircraft communication systems. - M.: Transport, 1990. (In Russian).

2. Under the general editorship Mokshanov V.V. The problems of organization of air traffic control. Safety // Collection of scientific works. GosNII "Air Navigation", 2002. Issue 4. (In Russian).
3. **Tuchkov N.T.** Automated systems and electronic warfare, air traffic management: textbook for universities. - M.: Transport, 1994. (In Russian).
4. **Solomentsev V.V., Ignatenko O.A.** Features of the operation of the hardware and software of automated air traffic control system // Scientific Herald of the MSTU CA. 2005. No. 92. (In Russian).
5. **Onishenko E.G., Zubkov, B.V.** Quantitative assessment of the level of safety in aviapedia-TII // Scientific Vestnik MSTU CA. 2007. No. 130. (In Russian).
6. **Korolyuk V.S., Turbin A.F.** Semi-Markov processes and their applications. - Kiev: Naukova Dumka, 1976. (In Russian).
7. **Vorobiev V.V., Konstantinov V.D.** The reliability and efficiency of aviation equipment. - M.: Transport, 1995. (In Russian).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Григорьева Елена Ивановна**, окончила Куйбышевский авиационный институт (1989), инженер-конструктор-технолог радиоаппаратуры, автор 1 научной работы, область научных интересов – организация воздушного движения, безопасность полетов, управление безопасностью авиационной деятельности. E-mail: 25\_grig@mail.ru.

**Замалдинов Максим Юрьевич**, 1985 г.р., окончил Донецкий национальный технический университет (2010), инженер-электромеханик, автор 1 научной работы, область научных интересов – организация воздушного движения, безопасность авиационной деятельности, прогнозирование редких событий в условиях неопределенности. E-mail: m.zamaldinov@mail.ru.